

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОПЛЕНКИ $\text{SiO}_2$ НА ПОВЕРХНОСТИ Si ПРИ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

Б. З. Нуриддинов, К. Т. Довранов, А. К. Таашатов

Каршинский государственный университет, 180003 Карши, Узбекистан  
[ataшатov@mail.ru](mailto:ataшатov@mail.ru)

### Аннотация

Имплантация низкоэнергетическими ионами в сочетании с отжигом позволяет получать не только однородные сплошные нанопленки  $\text{SiO}_2$ , но и пленки  $\text{SiO}_2$  с регулярно расположенными фазами нанокристаллического кремния. Независимо от типа окисления между однородной пленкой  $\text{SiO}_2$  и Si образуется переходный слой толщиной  $d$ , в котором концентрация O уменьшается с увеличением глубины  $d$  от  $\sim 65 \div 70$  ат. % до 0..

© 2023 Hosting by Central Asian Studies. All rights reserved.

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 6 Dec 2022

Revised form 5 Jan 2023

Accepted 10 Feb 2023

**Ключевые слова:** нанопленка, низкоэнергетический, поверхность, ионная доза, наносимые фазы, легированные, нанопленки, твердая фаза, осаждение, морфология.

\*\*\*

В последние годы активно проводятся фундаментальные и прикладные исследования, связанные с получением наноразмерных многокомпонентных слоистых структур, имеющих перспективы в создании новых приборов электронной техники, в том числе солнечной энергетики, а также изучения их электронных, оптических и эмиссионных свойств.

Наноразмерные структуры и многослойные системы на основе Si и  $\text{SiO}_2$  имеют перспективы в создании приборов нано-и оптоэлектроники. В частности, гетероструктуры  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  с различными нановключениями служат основой при разработке новых видов высокочастотных МОП транзисторов, интегральных схем, оптических преобразователей и солнечных элементов. В связи с этим, особое внимание уделяется усовершенствованию технологии получения и исследованию закономерностей формирования наноразмерных структур с новыми физическими свойствами [1,2-9].

В данной работе изучен состав и электронные свойства наноразмерных структур, созданных в поверхностной области монокристаллического Si имплантацией ионов  $\text{O}_2^+$ .

Перед ионной имплантацией поверхность Si очищалась прогревом до  $T = 1200 \div 1300$  K в течении  $10 \div 12$  часов и импульсным прогревом до  $T = 1500$  K. Кислород в прибор напускался через цельнометаллический натекаль. Ионный источник работал при давлении кислорода  $\sim 10^{-2}$  Па, при этом в измерительной части прибора давление не превышало  $\sim 10^{-6}$  Па. Плотность тока ионов на мишень составляла  $(1 \div 10) \cdot 10^{-6}$  А/см<sup>2</sup>. Диаметр пучка ионов в мишени лежал в пределах  $1,5 \div 2$  мм. В качестве подложки использованы образцы Si (111) n-типа в виде дисков с диаметром  $\sim 10$  мм и толщиной 1 мм.

Сначала были исследованы образцы Si, имплантированные ионами  $\text{O}_2^+$  с высокой дозой превышающей дозу насыщения ( $D \geq 6 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup>). В качестве примера на рис. 1 приведены АСМ- (рис. 1, а) и РЭМ- (рис. 1, б) изображения поверхности пленки  $\text{SiO}_2$ , полученные имплантацией ионов  $\text{O}_2^+$

в Si с  $E_0 = 3$  кэВ ( $D = 8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ) в сочетании с прогревом при  $T = 1100$  К. Толщина пленки  $\text{SiO}_2$  составляла  $\sim 50 \text{ \AA}$ .

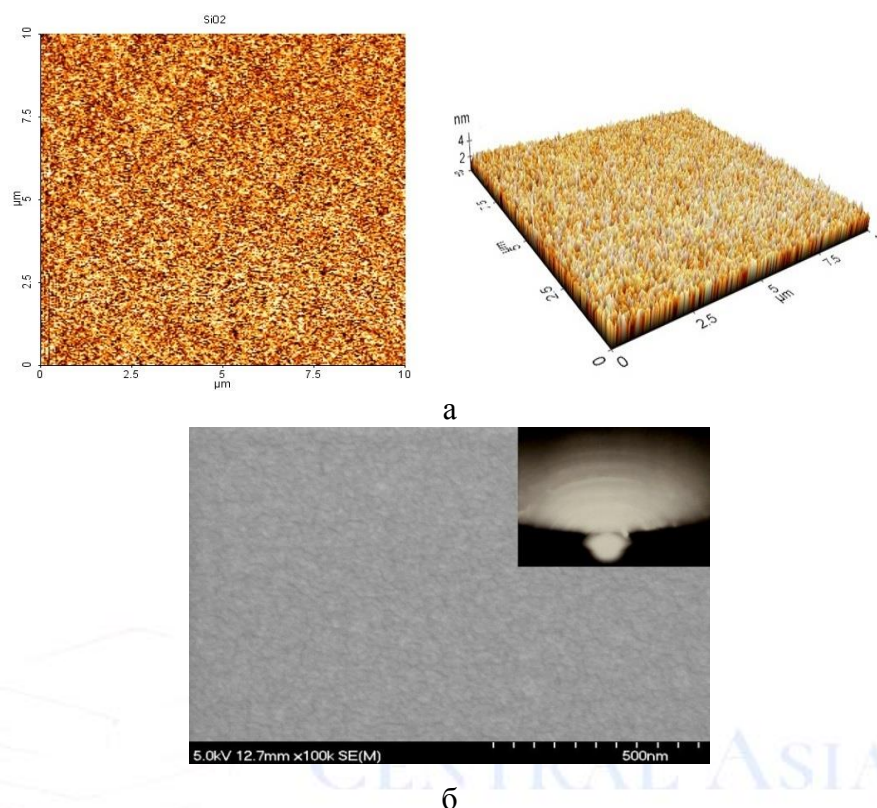


Рис. 1. АСМ-изображения (а) и РЭМ-картина (б) поверхности  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  с толщиной  $d \sim 50 \text{ \AA}$  (на вставке рис.1, б ДБЭ картина  $\text{SiO}_2$ ).

Видно, что при этом формировалась сплошная, однородная пленка с практически гладкой поверхностью, неровности которой не превышают  $8 \div 10 \text{ \AA}$ . В случае пленок полученных другими методами, в частности методом термического осаждения кислорода неровности поверхности составляют  $50 \div 100 \text{ \AA}$ . Отметим, что в случае  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  (111), в отличие от силицидов металлов [3,4-14], не наблюдался эпитаксиальный рост, образовалась поликристаллическая структура (вставка рис. 1, б). По форме ДБЭ-картин мы предполагаем, что пленки  $\text{SiO}_2$  состоят из отдельных блоков имеющих кубическую решетку, однако на границах блоков их ориентация не совпадает.

На рис. 2 приведен профиль распределения атомов кислорода по глубине сплошной пленки  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  (111) с толщиной  $\sim 50 \text{ \AA}$ . Видно, что между  $\text{SiO}_2 - \text{Si}$  формируется переходной слой с толщиной  $40 - 50 \text{ \AA}$ , где концентрация кислорода с глубиной монотонно уменьшается. Большая толщина переходного слоя по-видимому связана с резким отличием параметров решетки Si ( $a_{\text{Si}} = 5,43 \text{ \AA}$ ) и  $\text{SiO}_2$  ( $a_{\text{SiO}_2} = 7,13 \text{ \AA}$ ).

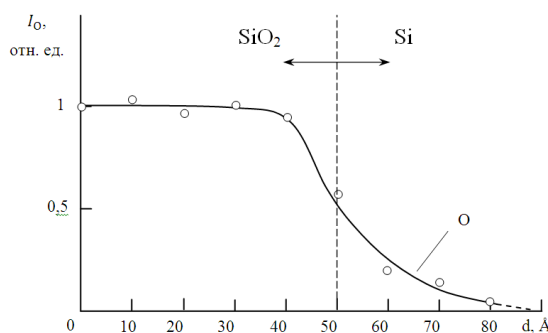


Рис. 2. Профили распределения атомов кислорода по глубине пленки  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  (111).

На рис. 3 приведены фотоэлектронные спектры чистого Si (111) и нанопленки SiO<sub>2</sub>/Si, снятые при  $h\nu=10,8$  и  $21,2$  эВ. За начало отсчета взять потолок валентной зоны, а положение уровня Ферми определялось относительно уровня  $E_F$  чистого Pd, который размещался в сверхвысоковакуумном приборе вместе с используемыми образцами [5]. Видно, что все кривые обладают явно выраженной тонкой структурой. В случае чистого Si наличие основных пиков можно объяснить возбуждением электронов из поверхностных состояний, а также из 3p и 3s состояний валентных электронов Si. В случае окиси кремния максимумы (особенности) могут быть обусловлены гибридизацией электронных состояний валентных электронов атомов легирующего элемента и подложки – Si [6,15-18].

Сравнение спектров 1 и 2 показывает, что в случае Si УФЭС хорошо отражает распределение плотности состояний валентных электронов при  $h\nu=10,8$  эВ, чем при  $h\nu=21,2$  эВ. Это связано с тем, что в случае полупроводников и металлов увеличение энергии квантов до  $20\div 25$  эВ приводит к образованию вторичных электронов, следовательно, заметно изменяются спектры фотоэлектронов.

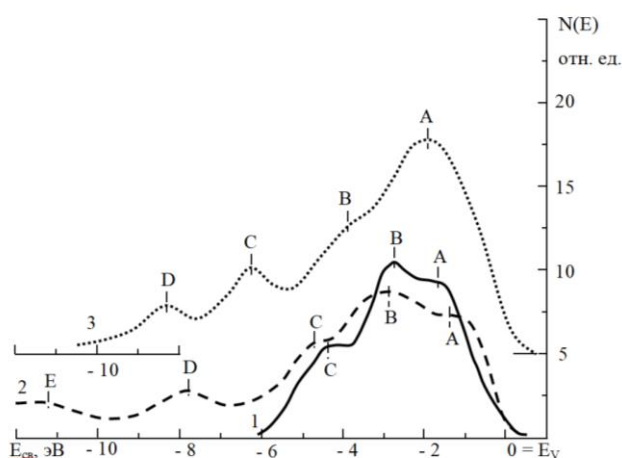


Рис. 3. УФЭ спектры Si (кривые 1, 2) и нанопленки SiO<sub>2</sub> (кривая 3) с  $d \approx 50$  Å, снятые при  $h\nu$ , эВ: 1 – 10,8; 2 – 21,2.

В таблице 1 приведены возможные механизмы формирования пиков в спектре фотоэлектронов, зонно-энергетические параметры и параметры кристаллических решеток Si и SiO<sub>2</sub>.

Таблица 1. Параметры зон и кристаллической решетки Si и пленки SiO<sub>2</sub>

Объекты исследования	Пики				Параметры зон, эВ				a, Å
	A	B	C	D	$E_V$	$E_F$	$E_g$	$\chi$	
Si	3p + ПС*	3p	3s+3p	3p	5,1	4,7	1,1	4	5,43
SiO <sub>2</sub>	2p(O)+3p(Si)	2p(O)+3p(Si)	2p(O)+3p(Si)	2p(O)+3s(Si)	9,1	4,5	8,9	0,1-0,2	поликрис-талл

ПС\* – поверхностные состояния.

Из таблицы видно, что значения ширины запрещенной зоны нанопленок SiO<sub>2</sub> составляет  $\sim 9$  эВ, что характерно для массивных монокристаллов SiO<sub>2</sub>.

Анализ спектров оже-электронов показал, что в этих участках содержатся атомы Si (рис. 4) (В случае МЛЭ и ТФЭ роста эти участки были пустыми – т.е. формируются поры [7]).

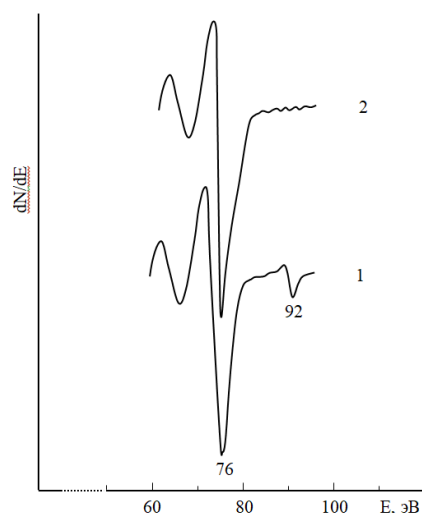


Рис. 4. Начальная часть Оже-спектров пленки  $\text{SiO}_2$ , полученные после прогрева Si, имплантированного ионами  $\text{O}_2^+$  с энергией  $E_0 = 3$  кэВ при дозах  $D$ ,  $\text{см}^{-2}$ : 1 –  $10^{16}$ , 2 –  $8 \cdot 10^{16}$ .

Увеличение  $T$  приводило к диффузии Si через эти участки к поверхности. При прогреве с  $T=1200$  К в течении 30 минут на поверхности формировалась пленка Si с толщиной  $10 \div 15$  Å, а в течении 60 минут –  $15 \div 20$  Å. Дальнейшее увеличение времени прогрева не приводило к заметному изменению толщины пленки Si. При  $T=1250$  К толщина пленки увеличивалась до  $25 \div 30$  Å. Во всех случаях пленки Si имели поликристаллическую структуру. Дальнейшее увеличение  $T$  приводило к десорбции Si с поверхности и частичному разложению  $\text{SiO}_2$ .

Степень покрытия поверхности Si окисью кремния оценивалась по отношению площади оже пика  $L_{23}VV$  кремния в Si (91 эВ) и в  $\text{SiO}_2$  (76 эВ):

$$\theta = \frac{I_{\text{Si}}(91 \text{ эВ})}{I_{\text{SiO}_2}(76 \text{ эВ})} = \frac{\Delta S_{\text{Si}}(91 \text{ эВ})}{\Delta S_{\text{SiO}_2}(76 \text{ эВ})} \quad (1)$$

Это отношение в рассматриваемом случае составило  $0,90 \div 0,92$ . При этом если учесть, что расстояние между центрами соседних кластеров лежит в пределах  $50 \div 60$  нм [4,8], то плотность наночастков которые являются стоками для Si составляет  $10^{10} \div 10^{11} \text{ см}^{-2}$ . Средний диаметр каждого отдельного наночастка примерно равен  $\sim 12 \div 15$  нм. Изменяя дозу ионов в пределах от  $\sim 8 \cdot 10^{15}$  до  $4 \cdot 10^{16}$  размеры наночастков можно регулировать в пределах от  $20 \div 25$  до  $5 \div 10$  нм. При  $D \leq 8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  наблюдалось формирование островковой пленки  $\text{SiO}_2$ .

Таким образом, низкоэнергетическая ионная имплантация в сочетании с отжигом позволяет получить не только однородные сплошные нанопленки  $\text{SiO}_2$ , но и пленки  $\text{SiO}_2$  с регулярно расположенными нанокристаллическими фазами кремния.

На рис.5 приведены зависимости интенсивности проходящего света  $I$  от энергии фотонов для сплошной пленки  $\text{SiO}_2$  и для пленки  $\text{SiO}_2$  с нанокристаллами Si. Видно, что в первом случае значение интенсивности проходящего света практически не изменяется по всей последующей области  $h\nu$  ( $0,4 \div 1,5$  эВ). Во втором случае до  $h\nu \leq 0,95$  эВ и после  $h\nu > 1$  эВ значение  $I$  заметно не меняется. В интервале  $h\nu \approx 0,95 \div 1,0$  эВ значение  $I$  резко уменьшается от  $\sim 1,0$  до  $0,85$ .

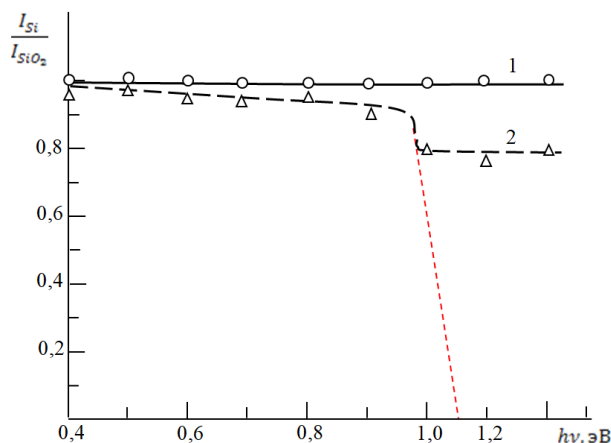


Рис. 5. Зависимость интенсивности проходящего света от  $h\nu$  для: 1 – сплошной пленки  $\text{SiO}_2$ , 2 – для пленки  $\text{SiO}_2$  с нанокристаллами Si.

Это уменьшение объясняется поглощением света нанокристаллами Si. Известно [4], что в нанокристаллических фазах Si с  $d \leq 25 \div 30$  нм начинают проявляться квантово-размерные эффекты. Однако в данном случае значения  $E_g$  для нанокристаллических фаз кремния составляет  $\sim 1,1$  эВ, что практически равно значению  $E_g$  для толстых пленок Si. По-видимому, когда нанокристаллические фазы Si непосредственно находятся в контакте с массивной пленкой Si в них не происходит существенного изменения зонно-энергетических параметров, т.е. не проявляются квантово-размерные эффекты. Расчеты показывают, что степень покрытия поверхности кремнием составляет  $\sim 0,15 \div 0,2$ .

Таким образом, низкоэнергетическая ионная имплантация в сочетании с отжигом позволяет получить не только однородные сплошные нанопленки  $\text{SiO}_2$ , но и пленки  $\text{SiO}_2$  с регулярно расположенными нанокристаллическими фазами кремния. Независимо от вида окисления между однородной пленкой  $\text{SiO}_2$  и Si образуется переходной слой с толщиной  $d$ , где концентрация O с ростом глубины  $d$  уменьшается от  $\sim 65 \div 70$  ат.% до 0.

### Список литературы

1. Светличный А.М., Агеев О.А., Шляховой Д.А. // Технология и конструирование в электронной аппаратуре, 2001, №4-5. С.38-43.
2. Кручинин В.Н., Перевалов Т.В., Камаев Г.Н., Рыхлийкий С.В., Гриценко В.А. // Оптические свойства нестехиометрического оксида кремния  $\text{SiO}_x$  ( $x < 2$ ) / Оптика и спектроскопия, 2019, том 127, вып.5, С.769-773.
3. Ergashov Y.S., Tashmukhamedova D.A., Rabbimov E. // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. -Russia, 2015, -Vol. 9, №2, -P.350–354. © Pleiades Publishing, Ltd.
4. Болтаев Х.Х., Ташмухамедова Д.А., Умирзаков Б.Е. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2014. № 4. с. 24 – 29.
5. Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А. Электронная спектроскопия нанопленок и наноструктур, созданных ионной имплантацией. – Ташкент: ТашГТУ, 2004. – 147 с.
6. Лифшиц В.Г. Электронная спектроскопия и атомные процессы на поверхности кремния. М.: Наука, 1985. 200 с.
7. Алтухов А.А. Разработка и исследование физико-технологических принципов создания микроэлектронных устройств на основе планарных многослойных гетероэпитаксиальных структур Si,  $\text{CaF}_2$  и  $\text{CoSi}_2$ , сформированных методом молекулярно-лучевой эпитаксии:



автореферат канд. дисс. М.: ЦНИТИ «Техномаш», 2005. 20 с.

8. Ergashov E. S., Isakhanov Z. A., and Umirzakov B. E. //Technical Physics, 2016, Vol. 61, No. 6, - P.953–955.
9. Umirzakov, B.E., Tashmukhamedova, D.A., Tashatov, A.K., Mustafoeva, N.M. Technical Physics, 2019, 64(5), 708–710
10. Umirzakov B.E., Tashmukhamedova D.A., Tashatov A.K., Mustafoeva N.M., Muradkabilov D.M. // Effect of the Disordering of Thin Surface Layers on the Electronic and Optical Properties of Si(111) // Semiconductors, 2020, 54(11), стр. 1424–1429
11. Н. М. Мустафоева, Н. М. Мустафаева // Исследование Физические Свойства Нанопленок Nisi2/Si // Таълим ва ривожланиш таълили онлайн илмий журнали, 2022 йил октябр, Vol. 2 No. 10 (2022)
12. N. M. Mustafoeva, A. K. Tashatov, N. M. Mustafaeva, X. J. Mavlonova //Investigation of Physical Properties of Nisi 2/Si Nanofilm // Pioneer: Journal of Advanced Research and Scientific Progress (JARSP)  
Volume: 01 Issue: 04 | 2022 ISSN: 2751-7551
13. N. M. Mustafoeva, A. K. Tashatov, N. M. Mustafaeva, X. J. Mavlonova //Surface Morphology of Nisi 2 /Si Films Produced By Solid-Phase Epitaxy// Pioneer: Journal of Advanced Research and Scientific Progress (JARSP)  
Volume: 01 Issue: 04 | 2022 ISSN: 2751-7551
14. А. К. Ташатов , Н. М. Мустафоева //Нанопленок CoSi2 На Поверхности Si При Твердофазном Осаждении // Miasto Przyszłości Kielce, Vol. 25 (2022):
15. Donaev S.B. Tashatov A.K. Mustafoeva N.M. // Electronic and Optical Properties of GaAlAs/GaAs thin films // Technical Phusics, Vol.64, Issue 10(2019), pp.1506-1508
16. Tashatov A.K. Mustafoeva N.M. // Surface Morphology of NiSi2/Si Films Obtained by the Method of Solid-Phase Deposition // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2020, Vol.14, No 1, pp. 81-84.
17. Ташатов А.К. Мустафоева Н.М. // Морфология поверхности пленок NiSi2/Si полученных методом твердофазной эпитаксии // Тенденции развития современной физики полупроводников: проблемы, достижения и перспективы; Сборник материалов международной онлайн конференции Ташкент. 2020. 92-97. с.
18. Ташатов А.К. Мустафоева Н.М. // Морфология, состав и структура поверхности пленок NiSi2/Si полученных методом твердофазной эпитаксии // Узбекский физический журнал, 23(2), 2021. С.55-60